

Evaluación de la respuesta espectral y biofísica de un cultivo de caña de azúcar a la fertilización nitrogenada

Tatiana Steet Carabalí Carabalí

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al
título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Directores:

I.Agr. M.Sc. Aldemar Reyes
Candidato a PhD

Codirector:

I.Agr. PhD. Enrique Torres Prieto

Grupo de Investigación:

Óptica Cuántica – Universidad del Valle

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y administración
Palmira, Colombia
2019

Contenido

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Planteamiento y justificación del problema.....	10
1.2. Objetivos	11
1.2.1. General	11
1.2.2. Específicos.....	11
1.3. Hipótesis	11
2. MARCO DE REFERENCIA	12
2.1. Marco teórico	12
2.1.2. La caña de azúcar.....	12
2.1.3. Características biofísicas de la caña de azúcar.....	12
2.1.4. Etapas vegetativas del cultivo	14
2.1.5. Requerimientos del cultivo	15
2.1.6. Requerimientos nutricionales	15
2.1.7. El nitrógeno	16
2.1.8. Estrés por deficiencia de nitrógeno	16
2.1.9. Espectroscopía óptica	17
2.1.10. Índices de vegetación.....	18
Modified Normalized Vegetation Index)	19
2.2. Estado del arte	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Caracterización de la zona de estudio.....	31
3.2. Características del cultivo.....	32
3.3. Características del suelo.	32
3.4. Manejo agronómico del cultivo.	33
3.5. Mediciones de variables biofísicas	34
3.5.1. Índice de área foliar (LAI)	34
3.5.2. Altura de tallos (HTVD):	35
3.5.3. Número de tallos:	35
3.5.4. Número de hojas verdes:	35
3.6. Medición de espectros.	35
3.7. Cálculo de índices de vegetación.....	36
3.8. Análisis de Varianza.....	37
3.9. Selección de los modelos de regresión	37
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	38
4.1. Análisis estadístico para las variables biofísicas	38
4.1.1. Número de tallos	38

4.1.2.	HTVD (Altura hasta la última hoja con lígula visible)	40
4.1.3.	Hojas verdes completamente expandidas	42
4.1.4.	Índice de Área Foliar-LAI.....	44
4.1.5.	Análisis de varianza	46
4.2.	Caracterización espectral a nivel de dosel de plantas de caña de azúcar bajo diferentes dosis de Nitrógeno.	48
4.3.	Cálculo de índices de vegetación con mayor sensibilidad a la respuesta de fertilización nitrogenada.....	53
4.3.1.	CIG (Chlorophyll Index Green)	54
4.3.2.	CVI (chlorophyll vegetation index)	58
4.3.3.	GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	61
4.3.4.	NDRE (Normalized Difference Red Edge).....	65
4.3.5.	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	69
4.3.6.	NDVIRE (Normalized red-edge difference vegetation index)	73
4.3.7.	MNDVI8 (Modified Normalized Vegetation Index)	77
4.3.8.	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	80
4.3.9.	VOGRE (Vogelmann red edge index)	84
4.4.	Modelos de regresión entre la respuesta espectral y variables biofísicas de la planta	89
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
5.1.	Conclusiones	94
5.2.	Recomendaciones	95
6.	ANEXOS	96
	ANEXO A: ANÁLISIS DE VARIANZA Y PRUEBAS POST ANOVA PARA VARIABLES BIOFÍSICAS	96
	ANEXO B: ANÁLISIS DE VARIANZA Y PRUEBAS POST ANOVA PARA ÍNDICES DE VEGETACIÓN	101
	ANEXO C: SUPUESTOS REGRESIONES	112
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

Índice de tablas

Tabla 1. Extracción de nutrientes del cultivo de caña de azúcar.....	15
Tabla 2. Algunos índices de vegetación utilizados en agricultura.	19
Tabla 3. Estado del arte	20
Tabla 4. Distribución de tratamientos dentro del experimento	31
Tabla 5. Descripción de características del suelo por cada unidad experimental.	32
Tabla 6. Manejo agronómico del cultivo	33
Tabla 7. Campañas de medición en días después de siembra (DDS)	36
Tabla 8. Esquema de distribución de las submatrices.	37
Tabla 9. Resumen estadístico para la variable número de tallos	38
Tabla 10. Resumen estadístico para la variable de HTVD.....	40
Tabla 11. Resumen estadístico para la variable de hojas verdes completamente expandidas.	42
Tabla 12. Resumen estadístico para LAI	44

Índice de Figuras

Figura 1. Modo de propagación de la caña de azúcar.	13
Figura 2. Estructura del tallo de la caña de azúcar.	13
Figura 3. Espectro electromagnético	17
Figura 4. Reflectancia de la vegetación.	18
Figura 5. Ubicación de la parcela experimental agrícola del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas de la Universidad del Valle.	31
Figura 6. Diseño experimental.	32
Figura 7. LAI-2200C Plant Canopy Analyzer	35
Figura 8. Medición de la altura de tallos.	35
Figura 9. Medición de espectros. a) Calibración con el blanco de referencia y el dark. b) Toma de muestras de reflectancia en dosel continuo.	36
Figura 10. Medias y desviaciones estándar para número de tallos.	39
Figura 11. Máximos y mínimos para número de tallos.	39
Figura 12. Diagrama de cajas y alambres para número de tallos	39
Figura 13. Medias y desviaciones estándar para HTVD	41
Figura 14. Máximos y mínimos para HTVD	41
Figura 15. Diagrama de cajas y alambres para HTVD.	42
Figura 16. Medias y desviaciones estándar para hojas verdes.	43
Figura 17. Máximos y mínimos para número de hojas verdes.	43
Figura 18. Diagrama de cajas y alambres para número de hojas verdes	44
Figura 19. Medias y desviaciones estándar para LAI	45
Figura 20. Máximos y mínimos para LAI	45
Figura 21. Diagrama de cajas y alambres para LAI	46
Figura 22. Curvas de Reflectancia para cada tratamiento: caso campaña de medición 1.	48
Figura 23. Curvas de Reflectancia para cada tratamiento: caso campaña de medición 2.	49
Figura 24. Curvas de Reflectancia para cada tratamiento: caso campaña de medición 3.	49
Figura 25. Curvas de Reflectancia para cada tratamiento: caso campaña de medición 4.	50
Figura 26. Curvas de Reflectancia para cada tratamiento: caso campaña de medición 5.	50
Figura 27. Curvas de Reflectancia para cada tratamiento: caso campaña de medición 6.	51
Figura 28. Temperatura y Radiación solar en la parcela experimental durante cada campaña de medición.	53
Figura 29. CIG campaña de medición No.1.	55
Figura 30. CIG campaña de medición No.2.	56
Figura 31. CIG campaña de medición No.3.	56
Figura 32. CIG campaña de medición No.4.	57
Figura 33. CIG campaña de medición No.5.	57
Figura 34. CIG campaña de medición No.6.	58
Figura 35. CVI campaña de medición No. 1.	59
Figura 36. CVI campaña de medición No.2.	59
Figura 37. CVI campaña de medición No.3.	60
Figura 38. CVI campaña de medición No.4.	60
Figura 39. CVI campaña de medición No.5.	61
Figura 40. CVI campaña de medición No.6.	61
Figura 41. GNDVI campaña de medición No. 1.	63
Figura 42. GNDVI campaña de medición No.2.	63
Figura 43. GNDVI campaña de medición No.3.	64

Figura 44. GNDVI campaña de medición No.4.....	64
Figura 45. GNDVI campaña de medición No.5.....	65
Figura 46. GNDVI campaña de medición No.6.....	65
Figura 47. NDRE campaña de medición No.1.....	66
Figura 48. NDRE campaña de medición No.2.....	67
Figura 49. NDRE campaña de medición No.3.....	67
Figura 50. NDRE campaña de medición No.4.....	68
Figura 51. NDRE campaña de medición No.5.....	68
Figura 52. NDRE campaña de medición No.6.....	69
Figura 53. NDVI campaña de medición No.1.....	70
Figura 54. NDVI campaña de medición No.2.....	71
Figura 55. NDVI campaña de medición No.3.....	71
Figura 56. NDVI campaña de medición No.4.....	72
Figura 57. NDVI campaña de medición No.5.....	72
Figura 58. NDVI campaña de medición No.6.....	73
Figura 59. NDVIRE campaña de medición No.1.....	74
Figura 60. NDVIRE campaña de medición No.2.....	74
Figura 61. NDVIRE campaña de medición No.3.....	75
Figura 62. NDVIRE campaña de medición No.4.....	75
Figura 63. NDVIRE campaña de medición No.5.....	76
Figura 64. NDVIRE campaña de medición No.6.....	76
Figura 65. MNDVI8 campaña de medición No.1.....	78
Figura 66. MNDVI8 campaña de medición No.2.....	78
Figura 67. MNDVI8 campaña de medición No.3.....	79
Figura 68. MNDVI8 campaña de medición No.4.....	79
Figura 69. MNDVI8 campaña de medición No.5.....	80
Figura 70. MNDVI8 campaña de medición No.6.....	80
Figura 71. SAVI campaña de medición No.1.....	82
Figura 72. SAVI campaña de medición No.2.....	82
Figura 73. SAVI campaña de medición No.3.....	83
Figura 74. SAVI campaña de medición No.4.....	83
Figura 75. SAVI campaña de medición No.5.....	84
Figura 76. SAVI campaña de medición No.6.....	84
Figura 77. VOGRE campaña de medición No.1.....	85
Figura 78. VOGRE campaña de medición No.2.....	86
Figura 79. VOGRE campaña de medición No.3.....	86
Figura 80. VOGRE campaña de medición No.4.....	87
Figura 81. VOGRE campaña de medición No.5.....	87
Figura 82. VOGRE campaña de medición No.6.....	88
Figura 83. Regresiones de índices de vegetación con HTVD.....	89
Figura 84. Regresiones de índices de vegetación con LAI.....	90
Figura 85. Regresiones de índices de vegetación con Número de hojas verdes.	90
Figura 86. Regresiones de índices de vegetación con Número de tallos.....	91
Figura 87. Comparaciones entre los coeficientes de regresión obtenidos para cada variable biofísica.....	92

RESUMEN

El Nitrógeno es el macroelemento más importante para garantizar el óptimo crecimiento del cultivo de caña de azúcar. Sin embargo, debido a su poca disponibilidad en formas fácilmente asimilables por las plantas, se ha recurrido a aplicaciones de fertilizante excesivas con el objetivo de garantizar una alta cosecha. En la actualidad, los grandes avances de la agricultura de precisión, permiten realizar una detección temprana y no destructiva de diferentes fenómenos que pueden ocasionar algún nivel de estrés en los cultivos. En el presente trabajo de investigación se realizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones con el objetivo de evaluar la respuesta espectral y biofísica de un cultivo de caña de azúcar (Variedad CC 01-1940) bajo diferentes dosis de fertilización nitrogenada (0% - 50% -100% - 150%) mediante el uso de microespectrómetros STS-VIS.

Se encontró que el tratamiento de dosis nula de fertilización nitrogenada mostró una mayor reflectancia en la banda de máxima absorción de clorofila; y que los tratamientos con mayores dosis de fertilización nitrogenada mostraron tener una baja reflectancia en esta zona. Las zonas en las que se presentaron los mejores comportamientos de los índices de vegetación, correspondieron a las unidades experimentales ubicadas en suelos con mayores contenidos de materia orgánica. Se establecieron los modelos de regresión para las variables biofísicas (altura, número de hojas verdes, número de tallos e índice de área foliar) en relación con los índices de vegetación evaluados. Para la variable de altura (HTVD) e índice de área foliar (LAI) se encontraron coeficientes de determinación de 0.87 y 0.80 para los índices de NDRE y CIG respectivamente. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y entre bloques para las variables biofísicas, siendo LAI la mas sensible a la fertilización nitrogenada por mostrar diferencias entre los tratamientos de 0% con los tratamientos de 100% y 150%.

Palabras clave: Nitrógeno, Reflectancia, caña de azúcar, índices de vegetación, variables biofísicas.

ABSTRACT

Nitrogen is the most important macro-element to guarantee the optimal growth of sugarcane crop. However, due to its limited availability in forms easily assimilated by plants, excessive fertilizer applications have been used in order to ensure a high yield. Nowadays, the great developments of precision agriculture allow an early and non-destructive detection of different events that can cause stress in crops. In the present research, an experimental design of completely randomized blocks with four treatments and five replicates was carried out in order to evaluate the spectral and biophysical response of a sugarcane crop (Variety CC 01-1940) at different doses of nitrogen fertilization (0% - 50% -100% - 150%) using STS-VIS microspectrometers.

It was found that the treatment of null dose of nitrogen fertilization showed a greater reflectance in the band of maximum absorption of chlorophyll; and that the treatments with greater dose of nitrogen fertilization showed to have a low reflectance in this zone. The zones in which the best vegetation index behavior was presented corresponded to the experimental units located in soils with higher organic matter content. Regression models were established for the biophysical variables (height, number of green leaves, number of stems and leaf area index) in relation to the vegetation indices evaluated. For Height (HTVD) and leaf area index (LAI), determination coefficients of 0.87 and 0.80 were found for NDRE and CIG indices respectively. Significant differences were found between treatments and between blocks for the biophysical variables, being LAI the most sensitive to nitrogen fertilization because it showed differences between treatments of 0% with treatments of 100% and 150%.

Keywords: Nitrogen, Reflectance, sugar cane, vegetative indices, biophysical variables.


```

Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 1.311599, Df = 1, p = 0.25211

> ncvTest(modelo.e.lm)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.08905209, Df = 1, p = 0.76539

> ncvTest(modelo.f.lm)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.388831, Df = 1, p = 0.53291

> ncvTest(modelo.g.lm)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.1339085, Df = 1, p = 0.71441

> ncvTest(modelo.h.lm)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.4354238, Df = 1, p = 0.50934
> ncvTest(modelo.i.lm)
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.1146872, Df = 1, p = 0.73487

```

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almutairi, B., El Battay, A., Ait Belaid, M., & Mohamed, N. (2013). Comparative Study of SAVI and NDVI Vegetation Indices in Sulaibiya Area Comparative Study of SAVI and NDVI Vegetation Indices in Sulaibiya Area (Kuwait) Using Worldview Satellite Imagry. *International Journal of Geosciences and Geomatics*, 1(March 2016), 50 – 53.
- Amador Pérez, B. B., González, Alcántar, G., García, Sánchez, P., Kalra, Y. P., Crumbaugh, J., Olive, C., ... Maldonado-Torres, R. (2007). Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en maíz. *Agrociencia*, 41, 827–835.
- Amaral, L. R., Molin, J. P., Portz, G., Finazzi, F. B., & Cortinove, L. (2014). Comparison of crop dosel reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 16(1), 15–28. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9377-2>
- Aponzá, J. A. (2019). *EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL EN PLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum Officinarum L.) BAJO DIFERENTES DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA*. Universidad del Valle.
- Atzberger, C. (2013). Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description , Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs, 949–981. <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Bedoya Duque, H. A., & Rendón Valencia, J. L. (2014). *Modelación del contenido de clorofila basado en la reflectancia medida por espectroradiometría de campo en caña de azúcar*. Universidad del Valle.
- Boddey, R. M., Urquiaga, S., Alves, B. J. R., & Reis, V. (2003). Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications, 139–149.

- Borden, R. J. (1945). The effect of nitrogen fertilization upon the yield and composition of sugar cane. *Hawaiian Planters' Record*, 49, 259–312.
- Borden, R. J. (1946). Harvesting controls. *Hawaiian Planters' Record*, 50, 19–27.
- Botero Herrera, J. M. (2009). *Determinación del nivel foliar de nutrientes mediante espectroscopía de reflectancia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Buenaventura Osorio, C. E. (1986). *El cultivo de la caña de azúcar*. (TECNICAÑA, Ed.). Cali, Valle del Cauca.
- Bulcock, H. H., & Jewitt, G. P. W. (2010). Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on dosel interception, 383–392.
- Calderón Medellín, L. A., Bernal Roza, A. M., & Pérez Trujillo, M. M. (2011). ENSAYO PRELIMINAR SOBRE LA UTILIZACIÓN DE UN MEDIDOR PORTÁTIL DE CLOROFILA PARA ESTIMAR EL NITRÓGENO FOLIAR EN ORÉGANO (*Origanum vulgare* L.). *Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2), 150–166. Retrieved from <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2051/1585>
- Casa, M. V. F. C. R. (2016). Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different dosel structures. *Precision Agriculture*, 17(3), 313–331. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9424-7>
- Chabot, R., Bouarfa, S., Zimmer, D., Chaumont, C., & Moreau, S. (2005). Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane dosel. *Agricultural Water Management*, 75(1), 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.12.010>
- Chen, Z., Pan, H., Liu, C., & Jiang, Z. (2017). *Agricultural Remote Sensing and Data Science in China. Federal Data Science: Transforming Government and Agricultural Policy Using Artificial Intelligence*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812443-7.00007-7>
- Confalonieri, R., Foi, M., Casa, R., Aquaro, S., Tona, E., Peterle, M., ... Acutis, M. (2013). Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.019>
- Coutinho, H., Franco, J., Otto, R., Eduardo, C., César, A., Cantídio, E., ... Trivelin, O. (2011). Field Crops Research Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions &, 121, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.011>
- Croft, H., Chen, J. M., & Zhang, Y. (2014). The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and dosel structures. *Ecological Complexity*, 17, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2013.11.005>
- DANE. (2016). *3er CENSO NACIONAL AGROPECUARIO*. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/files/images/foros/foro-de-entrega-de-resultados-y-cierre-3-censo-nacional-agropecuario/CNATomo2-Resultados.pdf>
- Das, B., Sahoo, R. N., Pargal, S., Krishna, G., Verma, R., Chinnusamy, V., & Sehgal, V. K. (2017). Comparison of different uni- and multi-variate techniques for monitoring leaf water status as an indicator of water-deficit stress in wheat through spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 160, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.007>
- De la Casa, A., & Ovando, G. (2007). INTEGRACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE LA DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) Y DEL CICLO FENOLOGICO DE MAÍZ PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO A ESCALA DEPARTAMENTAL EN CÓRDOBA, ARGENTINA Normalized Difference

- Vegetation Index (NDVI) and phenological data integ, 67(4), 362–371.
- Díaz Montejo, L. L., & Portocarrero Rivera, E. T. (2002). Manual de Producción de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.), 148. Retrieved from http://teca.fao.org/sites/default/files/technology_files/T1639.pdf
- Dillewijn, C. van. (1952). *Botany of sugarcane. Waltham: Chronica Botanica*.
- Dong, T., Liu, J., Shang, J., Qian, B., Ma, B., Kovacs, J. M., ... Shi, Y. (2019). Remote Sensing of Environment Assessment of red-edge vegetation indices for crop leaf area index estimation. *Remote Sensing of Environment*, 222(May 2018), 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.032>
- Dong, T., Shang, J., Liu, J., Qian, B., Jing, Q., Ma, B., ... Canisius, F. (2019). Using RapidEye imagery to identify within - field variability of crop growth and yield in Ontario , Canada. *Precision Agriculture*, (123456789). <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09646-w>
- Dos Santos Simões, M., Rubens, A., & Camargo, L. (2005). SPECTRAL VARIABLES , GROWTH ANALYSIS AND YIELD OF SUGARCANE, (June), 199–207.
- Elvanidi, A., Katsoulas, N., Augoustaki, D., Loulou, I., & Kittas, C. (2018). Crop reflectance measurements for nitrogen deficiency detection in a soilless tomato crop. *Biosystems Engineering*, 176(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.019>
- Estévez, A. A., Cock, J. H., & Hernández, P. (1995). Biología. In *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 31–63). Cali, Valle del Cauca: CENICAÑA. Retrieved from http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p31-62.pdf
- Evans, H. (1959). Elements other than nitrogen, potassium and phosphorus in the mineral nutrition of sugar cane. In *10th Congre. ISSCT* (pp. 473–508).
- Fauconnier, R., & Bassereau, D. (1975). *La caña de azúcar: Técnicas agrícolas y producciones tropicales*. Barcelona- España: Editorial Blume.
- Feng, W., Wu, Y., He, L., Ren, X., Wang, Y., & Hou, G. (2019). An optimized non - linear vegetation index for estimating leaf area index in winter wheat, (123456789). <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09648-8>
- Fernández-Novales, J., Tardaguila, J., Gutiérrez, S., Diago, M. P., & Mara, M. M. (2017). In field quantification and discrimination of different vineyard water regimes by on-the-go NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering, XXX(Crop Water Status)*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.018>
- Foster, A. J., Kakani, V. G., Ge, J., & Mosali, J. (2012). Discrimination of Switchgrass Cultivars and Nitrogen Treatments Using Pigment Profiles and Hyperspectral Leaf, 2576–2594. <https://doi.org/10.3390/rs4092576>
- García, C. E., Montero, D., & Chica, H. A. (2017). Evaluation of a NIR camera for monitoring yield and nitrogen effect in sugarcane. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n1.60852>
- García, D., Ramón, J., Alzate, D., & Palacios, J. (2019). Dynamics of the Indices NDVI and GNDVI in a Rice Growing in Its Reproduction Phase from Multi-spectral Aerial Images Taken by Drones. *Springer Nature Switzerland*, 1(893), 106–119. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3>
- García Ramos, C. A. (2015). Método para estimar el contenido de Nitrógeno en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) con base en espectrometría.
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2010). La textura de un suelo. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7775/Textura.pdf>
- Gomez, C., Lagacherie, P., & Coulouma, G. (2008). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from

- laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148(2), 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.016>
- Gourevitch, J. D., Keeler, B. L., & Ricketts, T. H. (2018). Determining socially optimal rates of nitrogen fertilizer application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254(September 2017), 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.002>
- Grespan, M., Margarito, F., Barros, M. De, Robson, S., Oliveira, D. M., & Rios, L. (2019). Biometric characteristics and dosel reflectance association for early-stage sugarcane biomass prediction, (August), 274–280.
- Guzmán, E. T. R., Regil, E. O., Gutiérrez, L. R. R., Alberich, M. V. E., Hernández, A. R., & Regil, E. O. (2006). Contamination of corn growing areas due to intensive fertilization in the high plane of Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 175(1–4), 77–98. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9114-1>
- He, L., Song, X., Feng, W., Guo, B.-B., Zhang, Y.-S., Wang, Y.-H., ... Guo, T.-C. (2016). Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 174, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.007>
- He, Y., Huang, M., García, A., Hernández, A., & Song, H. (2007). Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(2), 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.03.011>
- Huang, Y., Chen, Z. xin, Yu, T., Huang, X. zhi, & Gu, X. fa. (2018). Agricultural remote sensing big data: Management and applications. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(9), 1915–1931. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61859-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61859-8)
- Huete, A. . (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- Humbert, R. P. (2013). *The Growing of Sugar Cane*. Elsevier Science.
- Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Feng, H., Xu, X., Yang, G., & Wang, J. (2018). A review of data assimilation of remote sensing and crop models. *European Journal of Agronomy*, 92(October 2017), 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.002>
- José, G., Gava, D. C., Cesar, P., Trivelin, O., & Vitti, A. C. (2005). Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system, (1), 689–695.
- José, H., Rosa, A., Rios, L., Molin, J. P., & Cantarella, H. (2015). Sugarcane response to nitrogen rates , measured by a dosel reflectance sensor, (1), 840–848. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000900013>
- Junges, A. H., Fontana, D. C., & Lampugnani, C. S. (2019). Relationship between the normalized difference vegetation index and leaf area in vineyards. *Bragantia*, 1–9. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2018168>
- Khan, S., Shahnaz, M., Jehan, N., Rehman, S., Shah, M. T., & Din, I. (2013). Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 60, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.016>
- Landeros-Sánchez, C., Carlos Moreno-Seceña, Juan Castañeda-Chávez, Ma Lango-Reynoso, Fabiola Manuel Hernández-Pérez, J., Hernández-Lara, O., & Caballero-Hernandez, Á. J. (2016). AZÚCAR DE LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ , MÉXICO. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía Y Cambio Climático.*, 2(February), 43–52.
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Houlès, M., & Martiné, J. F. (2012). A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. *Precision Agriculture*, 13(5), 525–541. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9262-9>
- Li, D., Wang, C., Liu, W., Peng, Z., Huang, S., Huang, J., & Chen, S. (2016).

- Estimation of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) leaf nitrogen content at different growth stages using dosel reflectance spectra. *European Journal of Agronomy*, 80, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.001>
- Liang, S., & Wiley, A. J. (2004). *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New Jersey.
- Lofton, J., Tubana, B. S., Kanke, Y., Teboh, J., & Viator, H. (2012). Predicting Sugarcane Response to Nitrogen Using a Dosel Reflectance-Based Response Index Value. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0254>
- Ma, H., Pei, G., Gao, R., & Yin, Y. (2017). Mineralization of amino acids and its signs in nitrogen cycling of forest soil. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.09.001>
- Maheswari, M., Murthy, A. N. G., & Shanker, A. K. (2017). Nitrogen Nutrition in Crops and Its Importance in Crop Quality. In *The Indian Nitrogen Assessment* (pp. 175–186). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811836-8.00012-4>
- Mao, H., Gao, H., Zhang, X., & Kumi, F. (2015). Nondestructive measurement of total nitrogen in lettuce by integrating spectroscopy and computer vision. *Scientia Horticulturae*, 184, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.027>
- Mejía, M. A. (2019). *ESTIMACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO EN CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum officinarum), USANDO TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA DIFUSA (VIS-NIR)*. Universidad del Valle.
- MicaSense. (2017). Índices de vegetación cámara Micasense Red Edge. Retrieved from https://www.micasense.com/es/inicio?gclid=CjwKCAjw_MnmBRAoEiwAPRRWW80xBr0W8V4n3OnbvpcBgXqaeSLK_7A4OdByDbY6hJzBjuPHEZWn6RoC1ukQAvD_BwE
- Montenegro, F. D. (2018). *EVALUACIÓN ESPECTRAL DE PLANTAS DE AJÍ TABASCO EN CONDICIONES VARIABLES DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA*. Universidad del Valle.
- Munévar, F. (2013). Organismos del suelo. In *Ciencia del Suelo: Principios básicos* (pp. 440–457). Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Murillo, P., & Carbonell, J. (2012). *Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia. Cenicaña*.
- Mutanga, O., & Skidmore, A. K. (2004). Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), 37–41. <https://doi.org/10.1080/01431160310001654923>
- Noh, H., Zhang, Q., Shin, B., Han, S., & Feng, L. (2006). A Neural Network Model of Maize Crop Nitrogen Stress Assessment for a Multi-spectral Imaging Sensor. *Biosystems Engineering*, 94(4), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.04.009>
- Osorio Cadavid, G. (2007). *BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS -BPA-Y BUENAS PRÁCTICAS DE MANUFACTURA -BPM*. (C. P. Ltda, Ed.). Medellín: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org.co/manualpanela.pdf>
- Pereira, R. M., & Casaroli, D. (2016). Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) 1. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(2), 140–148. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/2530/253046235004.pdf>
- Pereira, R. M., Casaroli, D., Vellame, L. M., Júnior, J. A., & Evangelista, A. W. P. (2016). Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) 1. *Revista Agropecuária Tropical*, 46(2), 140–148. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639303>

- Perfetti, J. J., Balcázar, Á., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*. Bogotá. Retrieved from https://www.comfama.com/contenidos/servicios/Gerenciasocial/html/Eventos-academicos/catedra-de-gerencia-social/mision-rural/lecturas/Políticas-para-el-desarrollo-de-la-agricultura-en-Colombia-Libro-SAC_Web.pdf
- Portz, G., Amaral, L. R., & Molin, J. P. (2012). Measuring Sugarcane Height in Complement To Biomass Sensor for Nitrogen Management, (March 2016), 9. Retrieved from [https://www.ispag.org/abstract_papers/papers/abstract_1238\(1\).pdf](https://www.ispag.org/abstract_papers/papers/abstract_1238(1).pdf)
- Portz, G., Molin, J. P., & Jasper, J. (2012). Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precision Agriculture*, 13(1), 33–44. <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9243-4>
- Ramirez, A. (2013). *ALEJANDRO RAMIREZ MADRIGAL Zootecnista TESIS Maestría Medio Ambiente y Desarrollo Directora Ingeniera Civil , MSc . PhD . ROLANDO BARAHONA ROSALES Zootecnista , MSc . PhD . UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/39917/1/98711273.2014.pdf>
- Ramos, C. A. (2015). *Método para estimar el contenido de Nitrógeno en cultivos de maíz (Zea mays L.) con base en espectrometría. Caso de estudio Puerto Gaitán, Meta*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ribaudo, M., Delgado, J., Hansen, L., Livingston, M., Mosheim, R., & Williamson, J. (2011). Nitrogen in Agricultural Systems : Implications for Conservation Policy, (127).
- Sadowski, A., & Baer-Nawrocka, A. (2018). Food and environmental function in world agriculture—Interdependence or competition? *Land Use Policy*, 71(July 2017), 578–583. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.005>
- Salazar, R., Guadalupe, J., Chávez, L. T., Sáenz, E. M., Villa, M. S., García, P. S., ... León, C. (2007). PLANTAS DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill .) ESTRESADAS POR DEFICIENCIA DE AGUA Y NITRÓGENO Vegetation Index to Estimate the Growth of Tomato Plants (*Lycopersicon esculentum* Mill .) Stressed by Water and Nitrogen Deficiencies. *Leonardo*, 47–56.
- Salinas Zavala, C. A., Martínez Rincón, R. O., & Morales Zárate, M. V. (2017). Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 2017(94), 82–90. <https://doi.org/10.14350/RIG.57214>
- Schröder, J. J., Scholefield, D., Cabral, F., & Hofman, G. (2004). The effects of nutrient losses from agriculture on ground and surface water quality: the position of science in developing indicators for regulation, 7, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2003.10.006>
- Schultz, N., Morais, R. F. De, Alves, J., & Baptista, R. B. (2009). Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio, (1), 261–268.
- Silva, A. R. E., Cobelas, M. Á., & González, E. M. (2017). Impactos del nitrógeno agrícola en los ecosistemas acuáticos. *Revista Ecosistemas*, 26(1), 37–44. <https://doi.org/10.7818/RE.2014.26-1.00>
- Smil, V. (2011). Nitrogen cycle and world food production. *World Agriculture*, 2(Smil), 9–13.
- Swain, P. ., & Davis, S. . (1978). *Remote sensing: the quantitative approach*. (McGraw-Hill, Ed.). New York.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology* (3rd editio). Annals of Botany. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg079>
- Taylor, P., Guyot, G., Guyon, D., Riom, J., & Guyon, D. (2008). Factors affecting the spectral response of forest canopies : A review Factors Affecting the

- Spectral Response of Forest Canopies : A Review. *Geocarto International*, 4(3), 3–18. <https://doi.org/10.1080/10106048909354217>
- Tecnicaña. (2009). *Memorias Seminario Internacional de Fertilización y Nutrición de la Caña de Azúcar*. Cali, Valle del Cauca.
- Thorburn, P. J., Dart, A. I. K., Biggs, A. I. M., Baillie, C. P., Smith, A. M. A., & Keating, A. B. A. (2003). The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation, 201–209. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0086-2>
- Tsialtas, J. T., & Maslaris, N. (2008). Nitrogen fertilization effects on leaf morphology and evaluation of leaf area and leaf area index prediction models in sugar beet, 46(3), 346–350.
- Vallbé, J. J., & Soler, J. . (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 169–177. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- Villa, P. M., Sarmiento, L., Rada, F. J., Machado, D., & Rodrigues, A. C. (2017). Leaf area index of potato (*Solanum tuberosum* L .) crop under three nitrogen fertilization treatments Índice de área foliar del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L .) bajo tres tratamientos de fertilización nitrogenada, 35(2), 171–175. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n2.62110>
- Vincini, M., & Frazzi, E. (2008). A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the dosel scale. *Precision Agriculture*, 9(October 2008), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9075-z>
- Viveros, C. A. (2018). *Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 01-1940*. Cali, Valle del Cauca.
- Wang, J., Wang, D., Zhang, G., Wang, Y., Wang, C., Teng, Y., & Christie, P. (2014). Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention. *Agricultural Water Management*, 141, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.008>
- Xin, C., Qing-wei, Y., Jia-lin, S., Shuang, X., Fu-chun, X., & Ya-jun, C. (2014). ScienceDirect Research Progress on Nitrogen Use and Plant Growth N Metabolism Related to Plant. *Journal of Northeast Agricultural University*, 21(2), 68–74. [https://doi.org/10.1016/S1006-8104\(14\)60036-2](https://doi.org/10.1016/S1006-8104(14)60036-2)
- Zhao, C., Liu, L., Wang, J., Huang, W., Song, X., & Li, C. (2005). Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.002>
- Zhou, J., Khot, L. R., Bahlol, H. Y., Boydston, R., Miklas, P. N., Zhou, J., ... Miklas, N. (2016). Evaluation of ground, proximal and aerial remote sensing technologies for crop stress monitoring. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.005>
- Zillmann, E., Graeff, S., Link, J., Batchelor, W. D., & Claupein, W. (2006). Assessment of Cereal Nitrogen Requirements Derived by Optical On-the-Go Sensors on Heterogeneous Soils, 682–690. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0253>